

飞行器雷电间接效应的频域仿真方法

Simulation of lightning indirect effects in Aircraft

王万富 陈奇平

上海市航空航天器电磁环境效应重点实验室, 上海 200438

摘 要: 本文介绍了飞机雷电间接效应试验对电磁场仿真的需要, 并介绍了电磁场软件和雷电仿真建模方法, 给出了飞机表面雷电电流分布的初步仿真结果。

关键词: 雷电 间接效应 电磁场 仿真

Abstract: The significance of electromagnetic field simulation of aircraft lightning indirect effects test is described in this paper. The electromagnetic field software and lightning simulation modeling approach are presented as well as some simulation results of lightning current distribution on the aircraft surface.

Key words: lightning , indirect effects , electromagnetic field , simulation

1 引言

雷电间接效应是指雷击飞机产生瞬态电磁环境, 通过机内设备电缆耦合产生干扰信号, 导致电子设备功能紊乱。雷击瞬态电流冲击会破坏电子设备的正常工作, 是飞行器雷电防护设计所需要考虑的, 雷击电磁仿真是有效的分析手段。

全波电磁场数值算法是求解麦克斯韦方程的精确算法, 全波算法可分为时域和频域算法。常见的频域算法包括矩量法 (MoM)、有限元 (FEM) 等; 常见的时域算法包括时域有限差分 (FDTD)、有限积分法 (FI)、传输线矩阵法 (TLM) 等。只有全波算法才能适合于雷击电磁仿真, 由于雷击的瞬态特性, 有关飞机雷击电磁仿真的文献采用时域算法技术较多, 本文主要采用 FEKO 软件的矩量法对飞机雷电间接效应进行仿真研究。

2 雷击模型基本要素和原理仿真

飞行器遭遇雷击时, 机头和垂尾顶部常常成为雷电的进口, 机翼和尾翼常常成为雷电的出口, 此时机体结构成为雷电传输通道, 瞬态大电流沿机身结构流过, 在机体内部产生强电磁场, 从而通过机内设备电缆耦合产生干扰信号影响电子设备的正常工作。因此雷击电磁仿真模型的最基本要素是模拟雷击电流输入、机体结构几何模型、雷电的出口。

雷击输入是大电流脉冲信号, 由美国 SAE 学会公布的有关飞行器的一系列雷电试验波形成为国际公认的标准雷电波形, 其中电流分量 A 为双指数函数波形, 峰值电流达 200kA。双指数函数波形的数学表达式为:

$$I(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

电流分量A在式中: $I_0 = 218,810 \text{ A}$;

$\alpha = 11,354 \text{ s}^{-1}$; $\beta = 647,265 \text{ s}^{-1}$ 。

应用模块包括双指数函数波形, 可以产生图 1 所示为电流分量 A 的理想波形。图中可见电流上升到峰值的时间为 $6.4 \mu\text{s}$, 电流衰减到峰值 50%的时间为 $69 \mu\text{s}$, 和标准定义相符合。

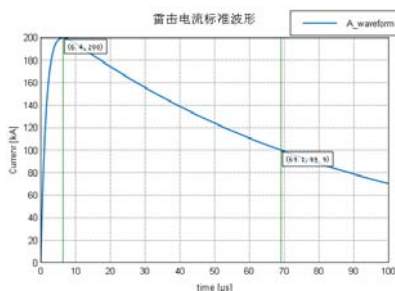


图1 标准雷电电流A波形

原理上矩量法能够解决任意复杂结构的电磁问题。雷击电磁仿真属于低频、电磁兼容问题的建模和仿真, 因此可以采用矩量法进行分析。

为了验证雷击仿真的可行性和准确性, 根据雷击电磁仿真的最基本要素采用矩量法进行了一个雷击简化模型仿真, 如图 2 所示, 雷击输入激励采用 **Impressed current**, 为一种压缩电流源, 用类似功分器的平面结构表征最简单机体结构, 在其中一端采用线段加以吸收负载用来模拟雷电的出口, 计算模型雷击的表面电流来分析。为了验证仿真结果另外又采用 **TLM** 算法对此进行建模仿真。两种算法的仿真模型和计算结果如图 3 所示, 由此可见两种计算结果非常接近并符合雷击电流分布和流动的原理。

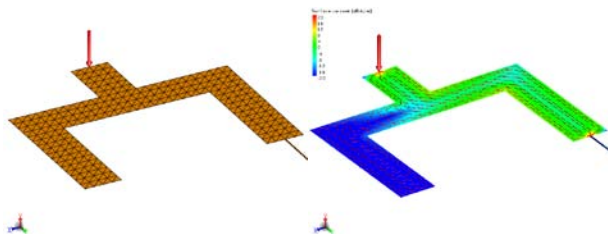


图2 矩量法雷击简化模型和仿真结果

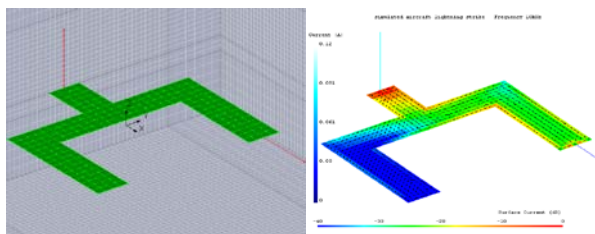


图3 TLM雷击简化模型和仿真结果

雷电防护设计的一个常用措施是: 从雷击进入点到离开点之间的机体结构要有良好电搭接, 采用机体表面良导体导电通道传输雷电电流并达到有效地释放雷击能量。在上述模型基础上设置了导电通道为良导体材料, 其它表面设置为损耗传导材料。仿真模型和计算结果如图4所示, 显示出这种雷电防护设计的原理和良好效果。

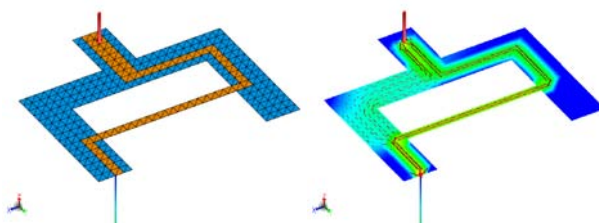
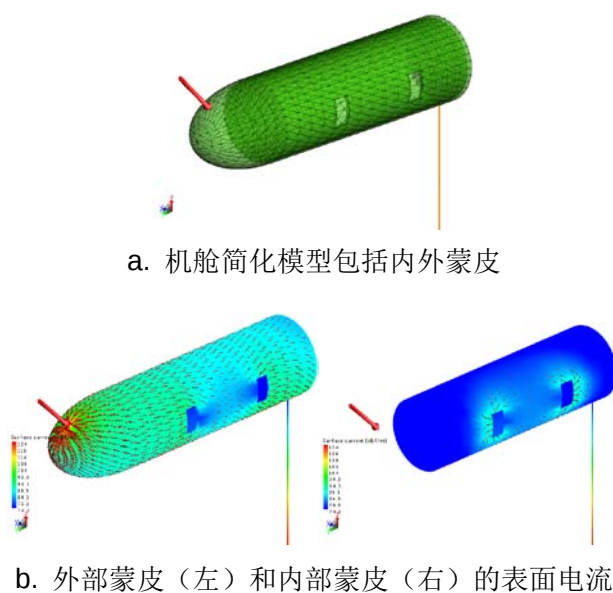


图4 导电通道传输雷电电流的模型和计算结果

飞机雷电间接效应与飞机机体结构、两侧窗口、内部和外部蒙皮及材料等都有着密切关系。图5所示建立了一个机舱简化模型来分析这种机理，计算结果说明外部蒙皮表面电流明显强于内部蒙皮表面电流，两侧窗口周围的表面电流较强，是将雷击电流产生强电磁场容易引入到机舱内部的部位。因而为了抑制电子设备电缆对雷击瞬态感应敏感度，在雷电防护设计的电缆布局中应当重视这种机理而且采取相应有效措施。



a. 机舱简化模型包括内外蒙皮

b. 外部蒙皮（左）和内部蒙皮（右）的表面电流

图5 机舱雷击简化模型和计算结果

3 飞机雷电仿真建模方法及算例

3.1 几何建模和电磁建模

用任何方法求解电磁问题，都需要对所处理的问题建立模型，包括几何建模和电磁建模。几何建模是用参数曲面或参数单元模拟真实曲面和结构的过程，电磁建模则是采用相应的电磁学计算方法求解问题的过程。实体几何模型CAD造型设计软件种类有很多，由于飞机的几何模型非常复杂，往往需要专业的设计人员才能够完成这种设计工作，即使利用现有的几何模型由于格式转换问题，在导入到电磁场软件中几何模型经常会有模型故障，因此需要进行几何模型的修复工作。图6是一个完成几何建模的某民航飞机实体模型。

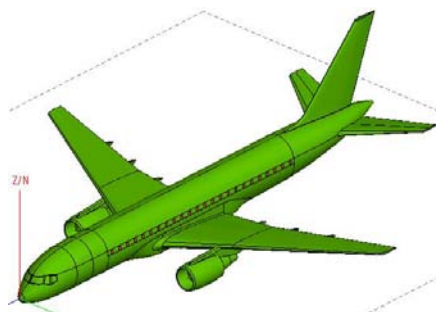


图6 某民航飞机实体模型

电磁建模可以借助和采用已有的电磁场分析软件来进行,可以导入需要仿真的飞机几何模型,建立模拟雷击附着点和电流输入激励,在飞机雷电的出口部位可采用线段加以吸收负载来模拟,在飞机内部布设线缆,再通过其他的仿真参数设置,如飞机表面材料和电导率、仿真频率、电场磁场近场分布、线缆感应电流电压等求解参数设置等等,从而完成雷击电磁建模过程。

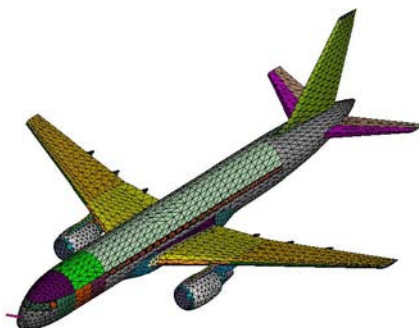


图7 经过网格优化的客机模型

采用矩量法,对于飞机之类的复杂模型通常计算量很大,再加上扫频范围各个频率点的计算,计算时间就非常多。对飞机模型网格划分优化,既保持几何逼近程度,又大量减少网格数量,就能大大减少未知量,从而提高雷电效应仿真的计算效率,也保持计算精度。如图7所示,这个客机模型的网格划分,采用了几个软件的结合运用,实现了网格模型优化。

雷电波形的频谱主要分布在100Hz~30MHz范围,因而雷电效应仿真也需要在这个频率范围进行计算与分析,为了以后能够实现时域处理分析,需要频率扫频几百个点的仿真计算。本客机仿真进行了雷击飞机头部、不同雷电通道出口状态的扫频范围频率点计算,得到了飞机表面电流分布、飞机舱体内部电场磁场等结果,如图8所示。

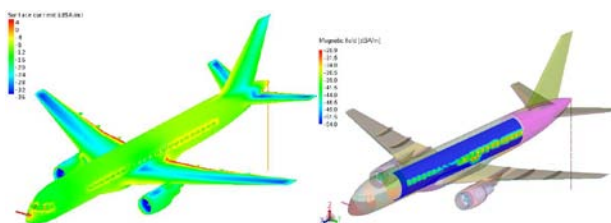


图8 客机 3MHz 频点的表面电流分布和内部磁场分布

3.2 雷电效应的线缆感应计算

飞机级雷电间接效应试验和仿真,都需要能够确定机载电子电气系统互联线束感应,而

线缆感应主要取决于飞行器、机身注入电流与机内区域耦合机理以及与机内电缆等因素。飞机电子设备包含有各类线缆线束，如单线、双绞线、排线、单芯及多芯屏蔽线，可以利用内置几十种标准型号单芯屏蔽线的数据库模型。

线缆感应计算属于EMC分析的场线耦合仿真求解，这方面有多种场线耦合算法，场线耦合求解基于传输线理论(TLT)和采用MoM+TLT混合技术，场线耦合求解也可以采用与CableMod结合使用。

一旦对飞行器雷击采用MOM求解得到三维结构的电磁场结果后，对机体内布设的线缆计算就可以利用先前电磁场数据直接计算，而不需要从新进行MOM矩阵求解，因此之后的线缆计算效率非常高，从而大大节省分析时间，这对于雷电防护设计的飞行器内部线缆合理布局的分析研究特别有用。

图9为客机雷击模型的一种内部线缆布局的仿真模型，图10为线缆感应的扫频计算结果。



图 9 客机雷击的内部线缆布局的仿真模型

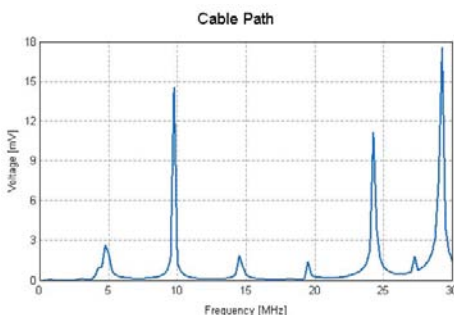


图 10 客机雷击的线缆感应的扫频计算结果

3.3 雷电试验导体回路路径的设计仿真

不同的飞行器雷击试验对导体回路路径的设计配置要求是不一样的，对于大部分的中小型飞行器，采用完全导体回路装置是更为合适的，技术原理是通过一个类似同轴线回路导体装置来实现的，飞行器完全置于导体装置中成为同轴传输线的中心导体，这样可以确保飞行器表面电流具有最小的扰动。

图11用圆柱舱体来分析导体回路路径的设计意义，图中a为简单的构成导体回路导致了表面电流分布的不均匀性，b为采用合适的完全导体回路仿真结果(c)显示出和空中雷击状态仿真结果(d)有着很好的接近。

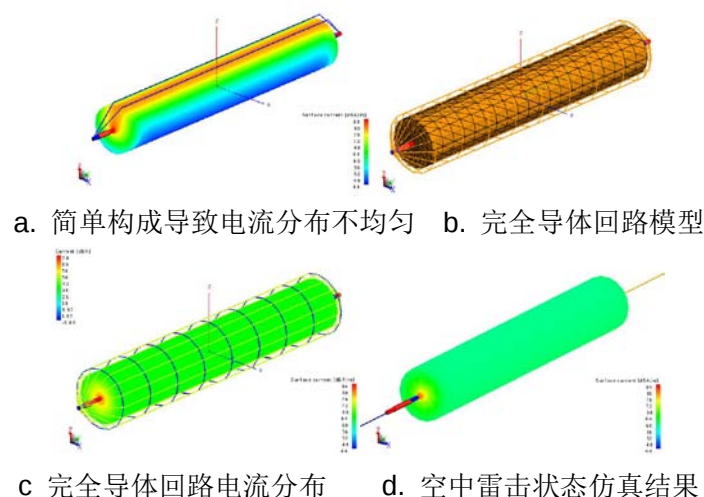


图 11 用圆柱舱体来分析导体回路路径的设计

4 结束语

本文通过对飞行器雷电间接效应进行仿真研究,说明采用FEKO矩量法的频域计算方法也是一种可行的研究手段,

本项研究工作得到了上海市科学技术委员会的资助,资助课题编号为13ZR1440600。

5 参考文献

- [1] SAE ARP5412A, "Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms", Revision A, 2/2005
- [2] Hybrid TL/MoM Solutions for Cable Coupling EMC Problems , FEKO Application Note , PDF
- [3] Jay Ely,Truong Nguyen, "Aircraft Lightning Electromagnetic Environment Measurement", PDF
- [4] Modeling Susceptibility of Large Airborne or Ground Based Structures to Lightning , CST Application Note , PDF
- [5] Marc Meyer , Franck Flourens,,Modeling of lightning indirect effects in CFRP Aircraft, 2008 IEEE
- [6] Terri He,Brian Kuhlman"Investigation of Lightning Induced Transients on Power Interfaces for Aircraft Avionics Systems",2005 IEEE